

М.А. Коваленко, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-5602-2001
О.Л. Тимошук, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0003-1863-3095
О.О. Самойленко, магістр-професіонал, ORCID 0000-0002-6540-8109
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

РОЗРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ МАЛОПОТУЖНИХ МАШИН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ЗБУДЖЕННЯМ

Матеріали статті представляють собою результат практичної розробки, що присвячена розробці експериментального стенду для дослідження параметрів та характеристик машин постійного струму малої потужності. За результатами роботи розроблено принципову схему для дослідження даних машин на основі мікроконтролера. Традиційні засоби вимірювання струму, напруги, швидкості обертання замінено сучасними давачами. Фіксування та обробка результатів дослідження виконується на персональному комп'ютері в напіваавтоматичному режимі. Також розроблено програмне забезпечення для реалізації необхідної програми випробувань: неробочий хід, коротке замикання і т.ін. за допомогою розробленого стенду можливо проводити випробування машин постійного струму як в режимі двигуна так і в режимі генератора, що суттєво підвищує його універсальність при незначних габаритних розмірах. Апаратна частина стенду є мобільною, тобто за допомогою одного блоку можливо забезпечити випробування різних машин. Застосування в якості регуляторів постійної напруги ШІМ дозволило знизити габаритні розміри та підвищити надійність експериментального стенду в цілому за рахунок відмови від масивних реостатів.

Ключові слова: експериментальний стенд, машина постійного струму, параметри та характеристики, електромагнітне збудження

Вступ Машини постійного струму з електромагнітним збудженням широко застосовуються в різних галузях промисловості, побуті, техніці, науці і т. ін. Їх значне використання та популярність пояснюється наявністю експлуатаційних параметрів та характеристик, таких як: високий пусковий і перевантажувальний момент, висока швидкість, широкий діапазон плавного регулювання частоти обертання.

Електричні машини постійного струму потужністю від десятка до сотень ват мають широке застосування в електроприводах гнучких виробничих систем, промислових роботів, систем автоматки і транспортних засобів. Вони також застосовуються в навчальному процесі для студентів енергетичного та електромеханічного профілю.

В роботі проведено аналіз існуючих стендів для випробування машин постійного струму. Основні вимоги до таких стендів були сформовані ще за радянського союзу і регламентуються відповідними ГОСТ, на основі яких сформовані основні етапи та процедури випробування таких машин [1-3]. Це класичні системи, що представляють собою сам досліджуваний агрегат та навантаження/привідний двигун. Для навантаження генераторів та двигунів постійного струму використовувались багатоступінчаті реостати великої потужності. Для регулювання струму збудження в обмотці збудження таких машин використовувались дротяні реостати. Програмою таких випробувань передбачено отримання робочих характеристик P_1 , I_a , η , $n = f(P_2)$, регульовальних характеристик для двигунів $n = f(I_a)$ та генераторів $I_a = f(I_a)$.

Відомо і сучасні засоби та методи для проведення випробувань малопотужних машин постійного струму. В загальні вони представлені в роботах [4-7]. В основу даних стендів покладено сучасні мікропроцесорні системи в сукупності із ШІМ, цифровими вимірювальними пристроями та комп'ютеризованими засобами обробки та візуалізації отриманих результатів. Подальший аналіз результатів проводиться в ручному або автоматичному режимі. Однак, основним недоліком таких систем є їх висока вартість та необхідність у висококваліфікованому обслуговуючому персоналі, складність пуску та налагодження таких систем.

На сьогоднішній день матеріально-технічна база більшості навчальних закладів, особливо технічних спеціальностей, суттєво застаріває. Це пов'язано як із бурхливим розвитком науки і техніки в цілому так і з слабким державним фінансуванням. Тому стоїть актуальне завдання оновлення матеріально-технічної бази вищих навчальних закладів та розроблення сучасних компактних, недорогих та багатфункціональних стендів, що стануть основою для проведення лабораторних робіт, практичних занять, науково-дослідних робіт і т.ін. З іншого боку зростають вимоги до енергоресурсозбереження, що вимагає зниження встановле-

ної потужності досліджуваних агрегатів. Нові стенди мають бути достатньо надійними і містити мінімальну кількість небезпечних в експлуатації предметів (наприклад реостатів, навантажувальних тумб, відкритих контактних

з'єднань). Основою таких стендів повинні бути сучасні цифрові пристрої, що виконують функції регулятора та контролера всіх електричних величин. Для підвищення безпеки роботи із таким обладнанням необхідно зменшувати робочу напругу до мінімально можливої, що підвищить безпеку під час проведення робіт з таким обладнанням.

Мета та завдання роботи полягає в розробці експериментального стенду для дослідження параметрів та характеристик малопотужних машин постійного струму з метою оновлення матеріально-технічної бази, зниження енергоспоживання, підвищення надійності лабораторного обладнання, підвищення безпеки під час роботи з обладнанням. Основним завданням в роботі є розробка принципової електричної схеми для випробування машин постійного струму та програмного забезпечення для керування та обробки результатів випробувань.

Матеріал і результати досліджень За основу в роботі взята малопотужна машина постійного струму ТИП незалежного збудження з наступними параметрами (табл. 1.)

Таблиця 1 Номінальні параметри досліджуваної МПС

№	Параметр	Величина
1	Номінальна робоча напруга	110 В
2	Номінальний струм якоря	2,35 А
3	Номінальна потужність	240 Вт
4	Номінальна швидкість обертання	3300 об/хв
5	ККД	
6	Тип збудження	незалежний
7	Опір обмотки збудження	980 Ом
8	Режим роботи	S1

На основі проведеного літературного пошуку для розробки експериментального стенду для дослідження малопотужних машин постійного струму з електромагнітним збудженням сформовано ряд принципових вимог:

- сумарна споживана потужність установки не має перевищувати 1,0 кВт з метою енергоспоживання;
- номінальна робоча напруга не повинна перевищувати 110 В з метою підвищення безпеки під час роботи з обладнанням;
- традиційні реостатні системи регулювання струму та напруги замінити ШІМ, з метою забезпечення компактності, підвищення надійності та зменшення енерговитрат;
- традиційні вимірювальні вольтметри та амперметри замінити відповідними цифровими давачами струму та напруги;
- забезпечити стенд цифровим вимірювачем швидкості;
- для обробки результатів та керування стендом використовувати мікроконтролери з простою можливістю інтеграції із персональним комп'ютером.

Стенд змонтований на базі популярного мікроконтролера Arduino Nano (Atmega328p) (Рис. 1), який повністю відповідає поставленим вимогам та завданням і може їх реалізувати. Він може подавати на силові ключі ШІМ сигнал, що дозволить плавно регулювати МПС.

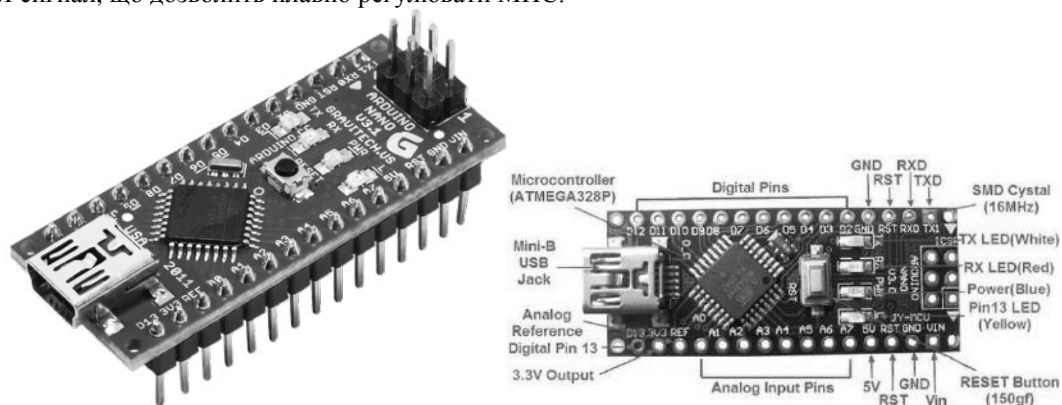


Рисунок 1– Основа стенду – мікроконтролер Arduino Nano

Даний мікроконтролер має можливість перетворювати аналогові сигнали з давачів струму та подільників напруги на цифрові та передавати ці данні на комп'ютер за допомогою віртуального терміналу через USB-порт. За допомогою вбудованого таймеру та зовнішнього фотодатчику можливо реалізувати точний вимір частоти обертів машин.

Стенд представляє собою дві електричні машини постійного струму, що з'єднуються між собою муфтою. Їх обмотки (якоря і збудження) послідовно з'єднані з джерелом живлення через датчики струму і силові ключі, які у свою чергу під'єднані до контролера. Наруга для вимірювання АЦП понижується резистивним дільником. Частота обертів вимірюється фотодатчиком.

Платформа Nano, побудована на мікроконтролері ATmega328 (Arduino Nano 3.0) або ATmega168 (Arduino Nano 2.x), має невеликі розміри і може використовуватися в лабораторних роботах. Вона має схожу з Arduino Duemilanove функціональність, проте відрізняється складанням. Відмінність полягає у відсутності силового роз'єму постійного струму і роботі через кабель Mini-B USB. Основні характеристики Arduino Nano, що використавується в складі розробленого стенду наведено в табл. 2.

Таблиця 2 Основні характеристики Arduino Nano

Мікроконтролер	Atmel ATmega168 або ATmega328
Робоча напруга (логічна рівень)	5 В
Вхідна напруга (рекомендована)	7-12 В
Вхідна напруга (граничне)	6-20 В
Цифрові Входи / Виходи	14 (6 з яких можуть використовуватися як виходи ШІМ)
Аналогові входи	8
Постійний струм через вхід / вихід	40 м
Флеш пам'ять	16 Кб (ATmega168) або 32 Кб (ATmega328) при цьому 2 Кб використовуються для завантажувача
ОЗУ	1 Кб (ATmega168) або 2 Кб (ATmega328)
EEPROM	512 байт (ATmega168) або 1 Кб (ATmega328)
Тактова частота	16 МГц
Розміри	1.85 см x 4.2 см

Для вимірювання постійного струму в обмотці якоря та збудження досліджуваних машин використовується доступний давач струму типу ACS712 (рис. 2).



Рисунок 2– Давач струму ACS712

Датчик струму ACS712 заснований на принципі, відкритому в 1879 році Едвіном Холлом (Edwin Hall). Мікросхема ACS712 випускається в мініатюрному 8-вивідному корпусі SOIC для поверхневого монтажу. Вона складається з прецизійного лінійного датчика Хола з малою напругою зміщення і мідним провідником, що проходить біля поверхні чіпа і виконує роль сигнального для струму. Вбудований формувач сигналу фільтрує створюване чутливим елементом напругу і підсилює її до рівня, який може бути визначений за допомогою АЦП мікроконтролера.

Силову основу стенду є транзистори. Вони виконують функцію регулятора напруги в обмотці якоря та збудження, використовуються для плавного пуску випробувальних двигунів. В роботі використовуються транзистори типу MOSFET IRF250 (200 В 30 А) для ланцюга обмотки якоря і MOSFET IRF840 (500 В 8,8 А) для ланцюга обмотки збудження (рис. 3).

Перевагою використання MOSFET в якості логічних перетворювачів очевидна, оскільки вони в статичному режимі не споживають енергії. Дійсно, не залежно від логічного стану на виході, завжди один із послідовно включених транзисторів є «відкритий», а інший «закритий», тому струм через них не протікає.

Проте при перемиканні із одного стабільного стану в інший (перехідний процес) звичайно струм протікає, і його слід враховувати (особливо при високих тактових частотах логічних схем). Крім того дані транзистори досить розповсюджені, що обумовлює їх невисоку вартість та доступність.



Рисунок 3— N-канальний MOSFET IRF250 та IRF840

Для вимірювання швидкості обертання використовується оптичний цифровий датчик (рис. 4).



Рисунок 4— Оптичний давач швидкості

Оптичний давач швидкості являє собою оптопару. Оптопара – оптоелектронний напівпровідниковий прилад, який складається з випромінювача та приймача випромінювання, між якими є оптичний зв'язок і забезпечена електрична ізоляція. Для роботи такого давача необхідно розмістити на валу двигуна диск або шматок твердого виробу (картону, пластику, текстоліту, акрилу і т.ін.). Оптоприймач рахує кількість імпульсів за одиницю часу і за допомогою програмного забезпечення в мікроконтролері визначається швидкість обертання. Давач є трьох провідним – по двом провідникам подається живлення "+" та "-", по третьому провіднику проходить сигнал від оптичного приймача, "-" в даній схемі є спільним.

Принципова електрична схема розробленого експериментального стенду наведено на рис. 5.

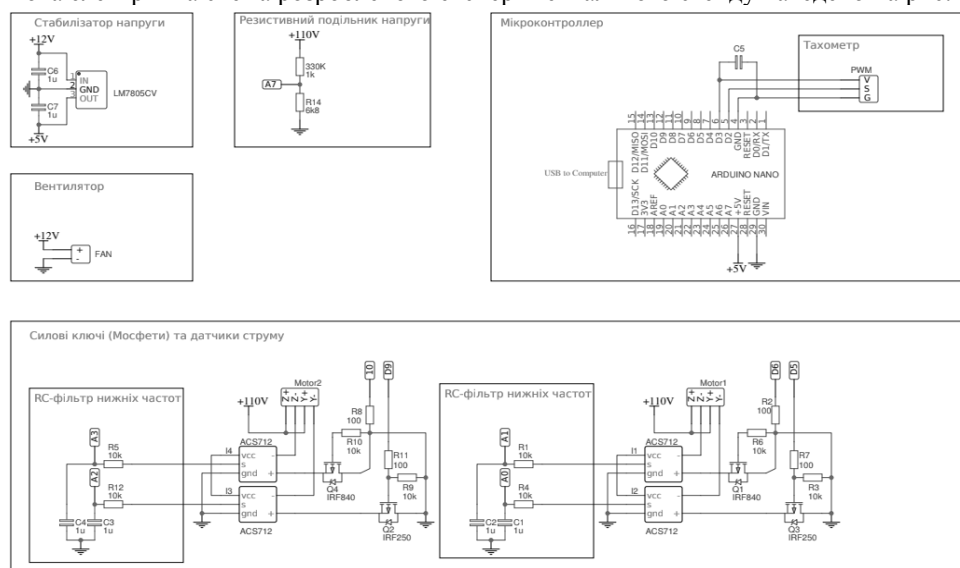


Рисунок 5— Принципова схема розробленого стенду

Апаратна частина розробленого експериментального стенду складається з наступних принципових частин та компонентів:

- джерело живлення 110В, що надходить з лабораторного блоку живлення на клеми керівного модулю;
- колекторні МПС з НЗ;
- модуль керування;
- мікроконтролер «Arduino nano» з мікросхемою зв'язку з комп'ютером;
- блок живлення 12в 300 мА;
- провідники та клемники;
- стабілізатор напруги на 5 В з конденсаторами;
- резистивний подільник напруги для вимірювання;
- два силових польових транзистори 500 В 8,8А;
- два силових польових транзистори 200 В 30А;
- алюмінієвий радіатор з ізолюючими прокладками та гвинтами, на якому закріплені транзистори, вентилятор для охолодження силових ключів;
- підтягуючі та обмежуючі резистори для транзисторів;
- датчики струму на ефекті Хола, що пропорційно перетворюють струм у напругу, що дозволяє виміряти її вбудованим АЦП мікроконтролера;
- RC фільтр нижніх частот. Необхідний, оскільки сигнали з датчиків струму не є неперервними, через те що силові ключі перемикаються з частотою 490 Гц;
- оптичний датчик на основі оптопари, що реагує на перешкоду, що заходить у його щілину. Дозволяє за допомогою вбудованого у мікроконтролер таймера вимірювати частоту обертів.

Загальний вигляд змонтованого експериментального стенду показано на рис. 6.

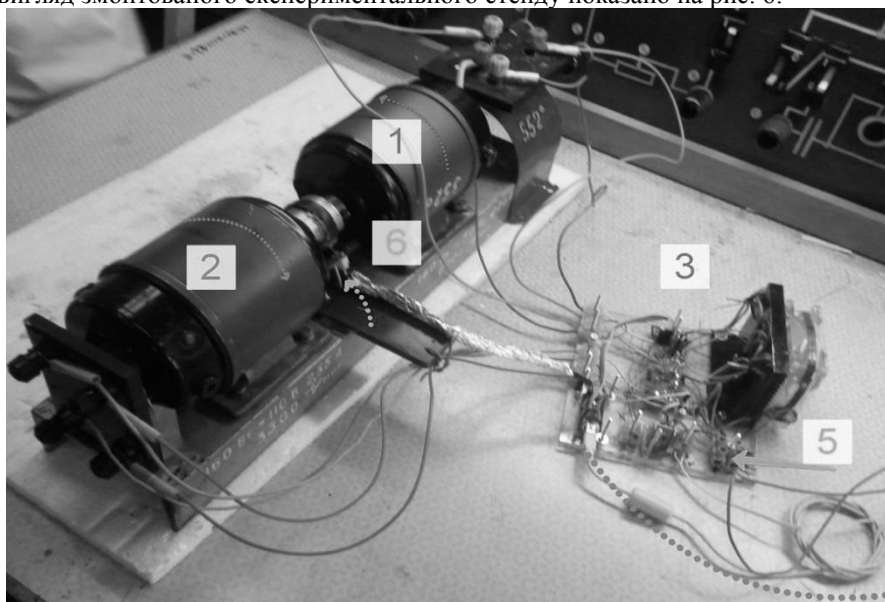


Рисунок 6– Загальний вигляд експериментального стенду

На рис. 6. показано: 1, 2 – досліджувані МПС із незалежним збудженням, які вмикаються зустрічно в режимі двигуна та узгоджено в режимі роботи генератора. В цьому режимі на обмотку якоря підключається реостат струмом 3 А, 50 Ом; 3 – апаратна частина, яка суміщає в собі мікроконтролер, силові ключі, давачі струму, напруги і т.ін.; 4 – панель живлення постійним струмом 110 В та джерело 220 В для блока живлення; 5 – входні термінали живлення стендом; 6 – оптичний давач швидкості; 7 – живлення мікроконтролера від автономного джерела;

До програмного забезпечення поставлені наступні вимоги: керування Мосфетами за допомогою ШІМ; зчитування показників датчиків, перерахунок значень; зчитування частоти обертів за допомогою переривань; комунікація з комп'ютером, отримання команд, вивід на екран показань; виконання поданих вище задач одночасно (Real-time). Всі вимоги були виконані за рахунок розробленої персонально та реалізованої в мікроконтролері авторської програми.

Розроблений експериментальний стенд здатен реалізовувати наступний функціонал за допомогою віртуального порту та програми Arduino ide (рис. 7): підключатися до комп'ютера, виводити данні на монітор, сприймати команди; одночасно керувати двома МПС з напругою живлення до 190В, струмом якоря до 5А, струмом збудження до 2А за допомогою ШІМ; плавно регулювати ШІМ з метою запобігання виходу

з ладу; вимірювати середній струм, протікаючий через обмотки з точністю до 0.1А; вимірювати частоту обертів з точністю до ± 5 об/хв; вимірювати вхідну напругу до 190В; розраховувати подану середню напругу за даними заповнення ШІМ та виміряної вхідної напруги; показувати час у секундах, з моменту підключення до комп'ютера з точністю до $\frac{1}{2}$ секунди.

Рисунок 7– Монітор послідовного порту для обробки та отримання результатів

Дані поділяються на стовпчики: час у секундах з моменту запуску, з точністю до $\frac{1}{2}$ секунди; 2 – стан ШІМу МОСФЕТів, де 0 – повністю закритий, 255 – повністю відкритий. МОСФЕТ 1-4; 3 – показники датчиків струму. Датчики струму мають точність близько 0.1 А; 4 – U_{in} – напруга на вході.

На рис. 8, для прикладу, показано розраховану характеристику $\eta=f(P_2)$ для досліджуваної МПС.

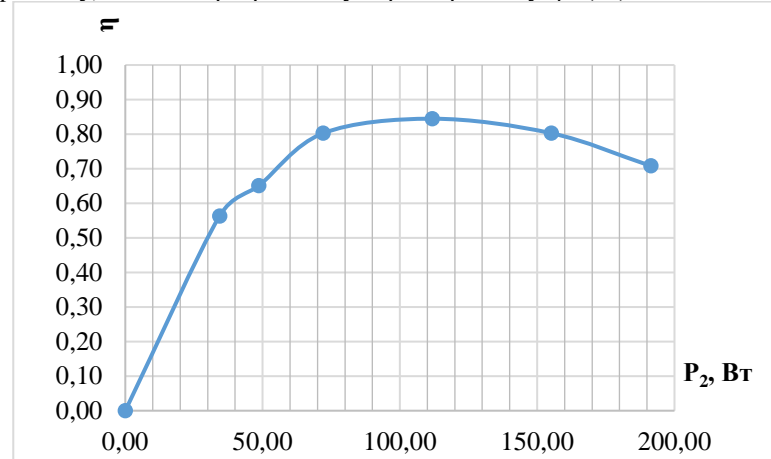


Рисунок 8– Робоча характеристика досліджуваної МПС

Висновки В роботі розроблено експериментальний стенд для дослідження малопотужних машин постійного струму. Використовуючи мікроконтролерну техніку, сучасні силові ключі та вимірювальні давачі, реалізовано авторське програмне забезпечення для керування досліджуваними електричними машинами та для реалізації будь-якої програми випробувань. Розроблений стенд можливо використовувати як в навчальному процесі для студентів напрямку енергетика, так і для дослідницьких цілей. За рахунок використання сучасних компонентів вдалося суттєво знизити габаритні розміри стенду та підвищити його енергоефективність. За допомогою розробленого стенду успішно проведено випробування МПС та отримано відповідні характеристики.

Список використаної літератури

1. Свирский Е.А., Попов П.К. Испытание машин постоянного тока. №3. КУБУЧ.: Ленинград, 1927.
2. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. Л., «Энергия», 1968.
3. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы. СПб.: Питер, 2007.
4. Коваленко М. А. Автономный экспериментальный стенд для випробування уніполярного крокового двигуна на базі мікроконтролера / М. А. Коваленко, Д. С. Мацюк. // Електротехніка і електроенергетика. – 2015. – №2. – С. 15–20.
5. K.Ramesh Design of Current Controller for Two Quadrant DC Motor Drive by Using Model Order Reduction Technique / K.Ramesh, K.Ayyar, Dr.A.Nirmalkumar, Dr.G.Gurusamy // International Journal of Computer Science and Information Security, Vol. 7, No. 1, 2010
6. K. Ramesh, A. Nirmalkumar and G. Gurusamy, “Design of Digital IIR filters with the Advantages of Model Order Reduction Technique”, International Journal of Electronics, Communications and Computer Engineering, Vol.1, No.2, pp 117-122, 2009

7. DC Motor with Speed and Current Closed Loops, Driven by eTPU on MCF523 [Електронний ресурс] // Freescale Semiconductor Literature Distribution Center. – 2005. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN2955.pdf>.

M. Kovalenko, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0002-5602-2001
O. Tymoshchuk, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0003-1863-3095
O. Samoylenko, Msc., **ORCID** 0000-0002-6540-8109
National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

DEVELOPMENT OF AN DEVICE FOR SMALL POWER DIRECT CURRENT MOTORS TESTING WITH ELECTROMAGNETIC EXCITATION

In this paper are presenting the results of practical development, dedicated to the development of an experimental device for the studying of the parameters and characteristics of low-power direct current motors. According to the results, a principal scheme for the testing of these machines based on the microcontroller was developed. Traditional methods for current and voltage measuring, rotation speed have been replaced by modern high-sensitivity sensors. Storing of testing parameters and characteristic's and its further post processing is performed on a semi-automatic mode with the help of personal computer. Also, software has been developed to implement the required test program: no load mode, short circuit mode, etc. This device can provide us to do different types of direct current motor mods: we can test it as motor mode as generator mode. It significantly increases its universality at small overall dimensions. The hardware of the experimental device is mobile, that is, with the help of one it is possible to provide testing of different motors which are situated in different places. As direct current regulators are use PWM which reduce the overall dimensions and increased the reliability of the experimental device due to the rejection of massive rheostats. With the help of its device are investigated some practical characteristics of small power direct current motor. These results are compare with theoretical results.

Key words: *experimental stand, DC machine, parameters and characteristics, electromagnetic excitation.*

References

1. Svirsky E.A., Popov P.K. Direct current motors testing. No. 3. KUBUCH.: Leningrad, 1927.
2. Gervais G.K. Electrical machines industrial testing. L., "Energy", 1968.
3. Voldek A.I., Popov V.V. Electrical motors. Introduction to electromechanics. Direct current motors and transformers. St. Petersburg: Peter, 2007.
4. Kovalenko M. A. Autonomous experimental device for unipolar step motor testing which base on microcontroller / M. A. Kovalenko, D. S. Matsyuk. // Electrical engineering and power engineering. - 2015. - No. 2. - S. 15–20.
5. K.Ramesh Design of Current Controller for Two Quadrant DC Motor Drive by Using Model Order Reduction Technique / K.Ramesh, K. Ayyar, Dr. A. Nirmalkumar, Dr. G. Gurusamy // International Journal of Computer Science and Information Security, Vol. 7, No. 1, 2010
6. K. Ramesh, A. Nirmalkumar and G. Gurusamy, "Design of Digital IIR filters with the Advantages of Model Order Reduction Technique", International Journal of Electronics, Communications and Computer Engineering, Vol.1, No.2, pp 117-122, 2009
7. DC Motor with Speed and Current Closed Loops, Driven by eTPU on MCF523 [Electronic resource] // Freescale Semiconductor Literature Distribution Center. - 2005. - Access mode to the resource: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN2955.pdf>.

Надійшла 12.10.2019
Received 12.10.2019